

Об одном методе исследования затухания волн на поверхности турбулизованной жидкости

С.А. Ермаков ¹, И.А. Капустин ¹, Т.Н. Лазарева ¹, О.В. Шомина ²

¹Институт прикладной физики РАН,
603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46
E-mails: stas.ermakov@hydro.appl.sci-nnov.ru,
kia@hydro.appl.sci-nnov.ru;

²Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23

Затухание гравитационно-капиллярных волн (ГКВ) в присутствии турбулентности является классической гидродинамической задачей, имеющей важные геофизические приложения, одно из которых связано с проблемой формирования радиолокационного и оптического изображения следа надводного судна на морской поверхности. В настоящей работе описан новый метод лабораторного исследования затухания поверхностных волн на турбулентности и полученные с его помощью первые результаты. Изучалось гашение турбулентностью стоячих ГКВ, параметрически возбуждаемых в кювете, установленной на вибростенде. Для возбуждения поверхностных волн и турбулентности использовался двухчастотный режим (сумма двух гармонических колебаний). Высокочастотный сигнал малой амплитуды – для параметрического возбуждения волн, низкочастотный сигнал большой амплитуды для возбуждения турбулентности при обтекании неподвижной перфорированной пластины. Коэффициент затухания волн определялся по порогу их параметрического возбуждения, а параметры турбулентности – с использованием методик PIV и PTV. Получены зависимости коэффициентов затухания ГКВ от частоты при различной интенсивности турбулентности и на их основе даны оценки величины турбулентной вязкости

Ключевые слова: гравитационно-капиллярные волны, турбулентность, турбулентная вязкость.

Введение

Взаимодействие волн с турбулентностью представляет собой одну из фундаментальных проблем гидродинамики, решение которой, однако, далеко от завершения. Важное геофизическое приложение данной проблемы связано с анализом механизмов затухания ветровых гравитационно-капиллярных волн и формирования зон “выглаживания” волнения на морской поверхности. Наряду с целым рядом причин (неоднородные течения, штилевые зоны, пленки поверхностно-активных веществ), такие зоны могут быть связаны с турбулентностью различной природы (см. Монин, Красицкий, 1985; Булатов, Кравцов, Лаврова, 2003; Ермаков, 2010). Одним из ярких примеров подавления турбулентностью волн на воде могут служить кильватерные следы надводных судов. В силу значительного подавления волн турбулентностью такие следы проявляются на радиолокационных и оптических изображениях морской поверхности в виде темных или ярких (в зависимости от условий наблюдения) полос за движущимися судами (Scully-Power, 1986; Vesecky, Stewart, 1982; Lyden и др., 1988).

К настоящему времени имеется ряд теоретических работ по затуханию ГКВ на турбулентности, где, в частности, рассматривался механизм затухания из-за “размешивания” волнового движения по глубине турбулентными скоростями (Боев, 1971), анализировалось затухание в рамках полуэмпирической модели турбулентности в терминах вихревой (турбулентной) вязкости (Баренблатт, 1978; Milgram, 1998), рассматривался эффект рассеяния волн на турбулентном поле скоростей (Phillips, 1959). Соотношение между рассмотренными механизмами, однако, пока остается не

выясненным. Экспериментальные исследования немногочисленны (Green, Medwin, Paquin, 1972; Olmez H., Milgram, 1992), здесь имеют место значительные различия как в постановке экспериментов, так и в результатах, что не позволяет сделать однозначных выводов относительно величин и зависимостей коэффициентов затухания волн от характеристик волн и турбулентности. Одной из вероятных причин таких различий является влияние неоднородных краевых течений, возникающих из-за ограниченности области генерации турбулентности. Такие течения могут приводить к трансформации волны, набегающей на область турбулизованной жидкости, в том числе и к усилению волны неоднородным течением, и тем самым маскировать эффект затухания ГКВ. В целом можно заключить, что имеющиеся в литературе результаты пока недостаточны для однозначных выводов о физических механизмах воздействия турбулентности на ГКВ, и проблема затухания ГКВ на турбулентности нуждается в дальнейшем исследовании. В частности, представляется необходимым развитие новых методов проведения экспериментов, в которых минимизировалось бы влияние неоднородных средних течений. Развитию одного из таких методов и получению с его помощью более корректных данных о затухании гравитационно-капиллярных волн в присутствии турбулентности и посвящена настоящая работа.

Эксперимент

Разработанная в ИПФ РАН установка включает вибростенд, на котором установлена заполненная водой кювета из оргстекла с размерами 260*65*230 мм. Вблизи дна кюветы параллельно ему расположена не связанная с кюветой перфорированная пластина, размер которой незначительно меньше размеров дна. Турбулентность возбуждается при обтекании неподвижной пластины за счет вертикальных колебаний кюветы с водой на вибростенде. Отметим, что упомянутая выше проблема минимизации средних краевых течений в данных лабораторных исследованиях была решена за счет того, что размеры решетки были близки к размерам дна кюветы.

В основе рассматриваемых экспериментов по затуханию ГКВ на турбулентности лежит метод параметрически возбуждаемых волн (см. Ермаков, 2010), предложенный ранее для изучения затухания ГКВ в присутствии поверхностных пленок. Как известно, условием параметрического возбуждения волн является равенство энергии накачки и диссипации энергии волны, которое может быть записано в виде:

$$\gamma_{\Sigma} = \frac{\delta g \cdot k \cdot \text{th}(kh)}{4\omega} \quad (1)$$

В (1) δg – пороговая амплитуда ускорения вибрирующего основания, ω и k – частота и волновое число параметрически возбуждаемых ГКВ (частота вибраций при этом равна 2ω), h – глубина жидкости. Измеряя пороговое ускорение можно найти коэффициент затухания ГКВ. В эксперименте ускорение колеблющейся на вибростенде кюветы измерялось пьезоакселерометром.

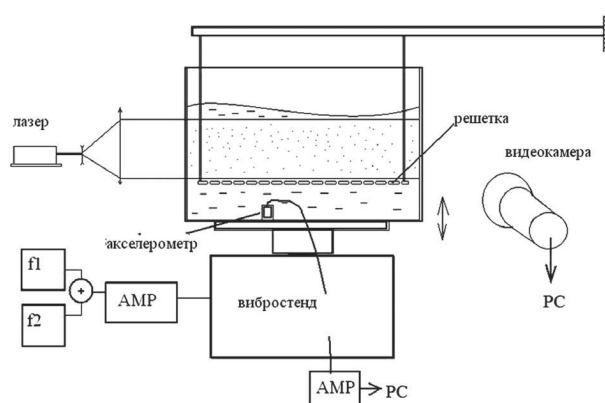
Особенностью предлагаемого метода исследования затухания ГКВ на турбулентности явилось одновременное использование вертикальных колебаний кюветы как для возбуждения турбулентности, так и измерения затухания ГКВ. Это достигалось использованием двухчастотного режима работы вибростенда, на который подавалась сумма двух синусоидальных

сигналов различной частоты и амплитуды. Высокочастотные малые колебания (с амплитудами, меняющимися от 0 до пороговых значений, обычно не более 0.5 мм) служат для параметрического возбуждения ГКВ, низкочастотные колебания большой (порядка 5 мм) амплитуды служат для возбуждения турбулентности при вертикальных колебаниях жидкости относительно неподвижной решетки. При этом, поскольку колебательные скорости на высокой частоте в несколько раз меньше, чем скорости на низкой частоте, можно пренебречь вкладом высокочастотных колебаний в энергию турбулентности, в частности, вблизи поверхности воды в пределах волнового слоя ГКВ (высокочастотные турбулентные вихри сильно затухают при удалении от пластины), а, следовательно, и вкладом в затухание ГКВ.

Для измерения характеристик турбулентности использовался лазер с мощностью 300 мВт, работающий на длине волны 532 нм. Лазерный луч с помощью оптической системы преобразовывался в пучок ножевой формы с толщиной ≈ 1 мм и шириной ≈ 15 см в исследуемой области жидкости. Для визуализации движения жидкости использовались полистирольные частицы (средний размер ~ 50 мкм). Движение частиц снималось на видеокамеру с регулируемым временем экспозиции. Сравнивая положения частиц на последовательных кадрах, можно определить характерные скорости пульсаций и масштабы турбулентных вихрей. Фотография экспериментальной установки приведена на рис.1(а), а схема эксперимента представлена на рис. 1(б).



а



б

Рис.1. Фотография (а) и схема (б) экспериментальной установки для исследования затухания стоячих ГКВ на турбулентности

Получение мгновенного поля скоростей турбулентности проводится путем корреляционной обработки последовательных во времени изображений с малым временем экспозиции (метод *particle imaging velocimetry* – PIV). После проведенной обработки возможно получить мгновенное поле скорости и, после усреднения по области изображения, среднеквадратичную величину скоростей турбулентности. Характерные значения последних имеют тот же порядок, что и колебательные скорости осциллирующей решетки: 5-10 см/с. Пример полученного мгновенного поля скорости приведен на рис. 2.

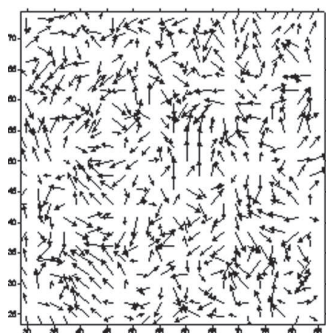


Рис. 2. Пример мгновенного поля скорости турбулентности

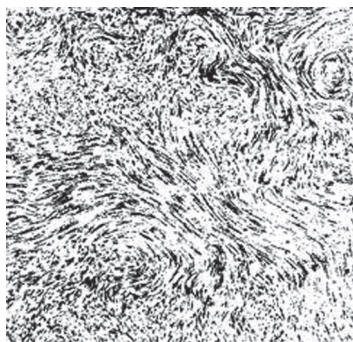


Рис. 3. Характерное изображение кадра при времени экспозиции 250 мс

Для визуализации траекторий жидких частиц и оценки масштабов турбулентных вихрей использовалась методика *particle tracking velocimetry* (PTV), когда время экспозиции при съемке выбиралось достаточно большим (до 50-250 мс), при этом на снимках были видны треки частиц, которые визуализировали их траектории. По предварительным оценкам масштаб вихрей составил 1-2 см. Вид полученного методом PTV изображения представлен на рис. 3.

Результаты измерений и обсуждение

Полученные в эксперименте зависимости коэффициента затухания ГКВ как функции их частоты представлены на рис. 4. Кривая (1) соответствует результатам теоретического расчета затухания ГКВ для дистиллированной воды, (2) – экспериментальным полученным значениям коэффициента затухания в отсутствие турбулентности, а зависимости (3,4) – коэффициентам затухания ГКВ в присутствии турбулентности, генерируемой решеткой с частотами колебаний 2 и 2,8 Гц соответственно. Из полученных зависимостей можно сделать вывод о значительном увеличении коэффициента затухания при наличии турбулентности.

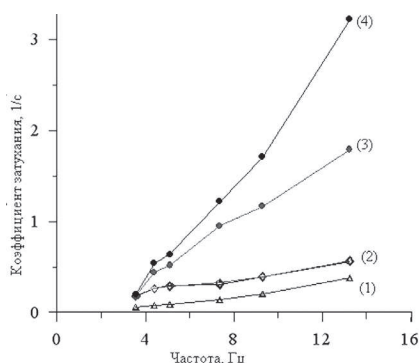


Рис. 4. Зависимость коэффициента турбулентной вязкости от частоты ГКВ

В отсутствие турбулентности коэффициент затухания ГКВ в ограниченном бассейне записывается в виде суммы (Ермаков, 2010)

$$\gamma \approx 2\nu k^2 + \sqrt{\frac{\nu\omega}{2}} \frac{2}{a}, \quad (2)$$

где первое слагаемое отвечает вязкому затуханию ГКВ на свободной поверхности, а второе вязкому затуханию, связанному с влиянием стенок бассейна. В (2) ν – молекулярная кинематическая вязкость жидкости, a - ширина кюветы (рассматриваются стоячие моды ГКВ с фронтами, параллельными ширине кюветы).

Описание затухания ГКВ γ_T в присутствии турбулентности можно провести по аналогии с затуханием волны из-за молекулярной вязкости, заменяя последнюю на величину турбулентной (вихревой) вязкости ν_T , при условии, что затухание в присутствии турбулентности существенно выше, чем для молекулярной вязкости. Таким образом, для оценок коэффициента затухания ГКВ можно использовать выражение:

$$\gamma_T \approx 2\nu_T k^2 + \sqrt{\frac{\nu_T\omega}{2}} \frac{2}{a} \quad (2a)$$

Из (2a) можно найти величину ν_T , учитывая, что все остальные величины в (2a) известны из эксперимента.

Полученные значения коэффициента турбулентной вязкости представлены на рис.5. Кривая (1) соответствует значению интенсивности турбулентности со среднеквадратичной (RMS) величиной турбулентных скоростей 6,15 см/с (возбуждаемыми при колебаниях кюветы на частоте 2 Гц), кривая (2) – турбулентности с RMS скоростей 7,62 см/с (отвечающей частоте возбуждения 2,8 Гц). Значения RMS скоростей были измерены в эксперименте с использованием техники PIV.

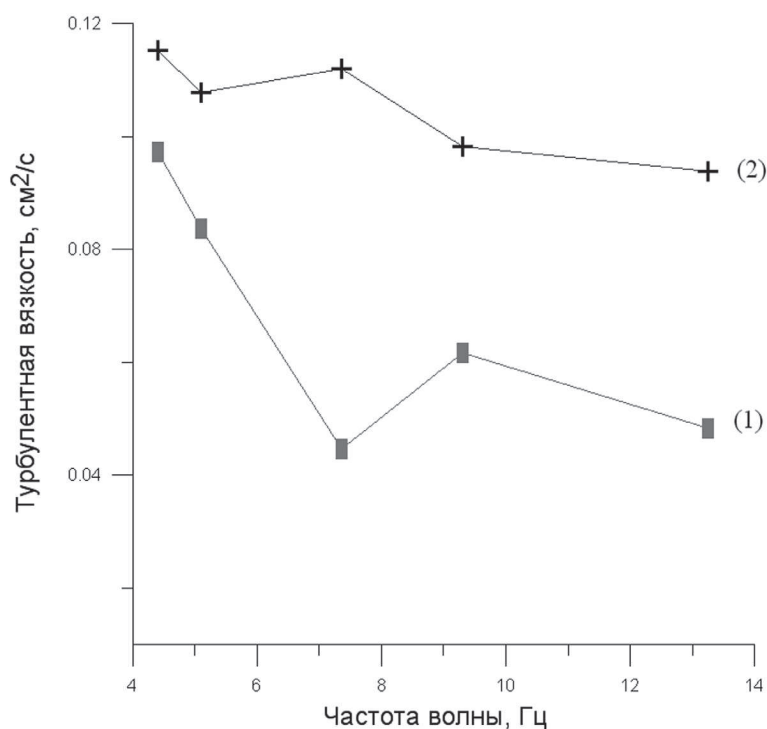


Рис.5. Зависимость коэффициента турбулентной вязкости от частоты ГКВ

Интересно отметить, что приведенные значения турбулентной вязкости в пределах ошибки эксперимента пропорциональны величинам турбулентных скоростей при различных частотах колебаний источника турбулентности (2 и 2,8 Гц). Это согласуется с полуэмпирическим описанием вихревой вязкости как величины, пропорциональной произведению среднеквадратичной скорости пульсаций на их масштаб (см., например, Шлихтинг, 1969) и не противоречит использованию соотношения (2а) для определения коэффициента турбулентной вязкости по аналогии с молекулярной.

Сравнивая полученные значения с молекулярной вязкостью воды (равной 0,01 см²/с), можно сделать вывод, что турбулентная вязкость в условиях экспериментов оказывается примерно на порядок выше. При этом с ростом интенсивности турбулентности (достигаемой в данном случае за счет увеличения частоты ее возбуждения при неизменной амплитуде колебаний кюветы) растет и величина турбулентной вязкости.

Полученный вывод о том, что турбулентная вязкость существенно увеличивает диссипацию ГКВ, находится в качественном согласии с эффектом «выглаживания» морской поверхности в присутствии турбулентности, генерируемой движущимися судами. В дальнейшем предполагается выполнить ряд исследований, имеющих целью уточнить и обобщить данные, а также сделать возможные теоретические выводы из полученных результатов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 11-05-00295, 10-05-00101), программы РАН «Современные проблемы радиофизики».

Литература

1. *Баренблатт Г.И.* Подобие, автомодельность, промежуточная асимптотика. Теория и приложения к геофизической гидродинамике // Л.: Гидрометеиздат, 1978. 190 с.
2. *Боев А.Г.* О гашении поверхностных волн сильной турбулентностью // Изв. РАН ФАО. 1971. №7. С. 31 – 36.
3. *Булатов М.Г., Кравцов Ю.А., Лаврова О.Ю.* и др. Физические механизмы формирования аэрокосмических радиолокационных изображений океана // УФН. 2003. Т.173. № 1. С. 69-87.
4. *Ермаков С.А.* Влияние пленок на динамику гравитационно-капиллярных волн // Нижний Новгород: ИПФ РАН. 2010. 165 с.
5. *Монин А.С., Красицкий В.П.* Явления на поверхности океана // Л.: Гидрометеиздат. 1985. 375 с.
6. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя // М.: Наука. 1969. 742с
7. *Green T., Medwin H., Paquin J.* Measurements of surface wave decay due to underwater turbulence // Nature Phys. Sci. 1972. V. 237. p. 115 – 117.
8. *Lyden J.D., Hammond R.R., Lyzenga D.R., Shuchman R.A.* Synthetic aperture radar imaging of surface ship wakes // J. Geophys. Res. 1988. V. 93 (C10) P. 12293-12303.
9. *Milgram J.H.* Short wave damping in the simultaneous presence of a surface film and turbulence // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. p. 15717 – 15272.
10. *Olmez H., Milgram J.H.* An experimental study of attenuation of short water waves by turbulence // J. Fluid Mech. 1992. V. 239. p. 133 – 156.
11. *Phillips O.M.* The scattering of gravity waves by turbulence // J. Fluid Mech. 1959. . V. 5. p.177-192.
12. *Scully-Power P.* Navy Oceanographer Shuttle Observations, STS 41-G, Mission Report Naval Underwater Systems Center Tech. Rep. NUSC TD 7611, 1986. 71 pp.
13. *Vesecky J.E., Stewart R.H.* The observation of ocean surface phenomena using imagery from the SEASAT synthetic aperture radar // J. Geophys. Res. 1982. V.87(C5). P.3397-3430.

On a method of investigation of damping of waves on a surface of turbulized liquid

S.A. Ermakov¹, I.A. Kapustin¹, T.N. Lazareva¹, O.V. Shomina²

¹*Institute of Applied Physics RAS,
603950, Nizhny Novgorod, Ul'janova St. 46
E-mails: stas.ermakov@hydro.appl.sci-nnov.ru,
kia@hydro.appl.sci-nnov.ru;*

²*Nizhny Novgorod State University
603950, , Nizhny Novgorod, Gagarina Pr. 23*

Damping of gravity-capillary waves (GCW) due to turbulence is a classical hydrodynamic problem which has important geophysical applications, such as radar and optical imaging of ship wakes on the sea surface. A new method of investigation of GCW damping due to turbulence and obtained first results are described in this paper. Damping of GCW parametrically excited in a vessel installed on a vibrating table was studied. GCW and turbulence were generated in a two-frequency regime (a sum of two harmonic oscillations). The high frequency/small amplitude signal was used for parametric excitation of GCW, the low frequency/large amplitude signal – for generation of turbulence when flowing a stable perforated plate around. The wave damping coefficient was determined when measuring the GCW excitation threshold, and the parameters of turbulence were measured with PIV and PTV methods. Dependencies of GCW damping coefficient vs. wave frequency at different intensities of turbulence are presented and the turbulent viscosity values are estimated from these dependencies.

Keywords: gravity-capillary waves, turbulence, turbulent viscosity